

VINILÉSZTER MÁTRIXÚ KOMPOZIT RAGASZTOTT KÖTÉSÉNEK TÖRÉSMECHANIKAI JELLEMZŐI

TAKÁCS LÁSZLÓ^{1,2}SZABÓ FERENC²

A polimer kompozit szerkezetek mechanikai viselkedésének numerikus számítási módszerei folyamatosan fejlődnek. Az alkatrészek deformációs viselkedésén és tönkremenetelén túl fontos a szerkezetben lévő kötések mechanikai jellemzése is. Munkánk célja üvegszálerősítésű, vinilészter mátrixú kompozit ragasztott kötésének törésmechanikai vizsgálata DCB- és ENF-tesztek segítségével. A ragasztott kötések elkészítése során kötőanyagként vinilésztert és egy metakrilát ragasztót alkalmaztunk. Az elvégzett vizsgálatok eredményeiből meghatároztuk az I. és II. törési módra értelmezett fajlagos repedésterjesztő erőt, ami későbbi végeselemes szimulációkhoz szolgáltat bemenő paramétereket. Az eredmények azt mutatják, hogy ezeknél az anyagpároknál a mérési adatok feldolgozására a módosított rúdelmélet vagy a rugóállandó-kalibrációs módszerek alkalmasak, a tönkremenetel előtti nemlineáris hatások figyelembevétele miatt. A kötőanyagokat tekintve a metakrilát ragasztó egy nagyságrenddel nagyobb fajlagos repedésterjesztő erőt mutatott és a repedésterjedés is stabilabb a ridegebb viselkedésű vinilészterhez képest.

1. BEVEZETÉS

A járműipar jövője számos kihívással néz szembe az egyre szigorúbb korlátozások miatt a károsanyag-kibocsátás, az energiafelhasználás és az alkatrészek újrahasznosíthatósága tekintetében és emellett a költséghatékonyság fenntartásának szükségessége kapcsán. A súlycsökkentés az alkatrészek innovatív tervezésén és a megfelelő anyag kiválasztáson keresztül nagy hatással lehet a célok elérésére, mivel a gépjármű életciklusában az energia-felhasználás döntő része az üzemeltetési szakaszban történik. Ezek mellett a járműveknek egyre szigorúbb biztonsági előírásoknak és ütközésállósági feltételeknek is eleget kell tenniük. A célok teljesítése komoly kihívást jelent és nem megy kompromisszumok nélkül. A súlycsökkentés tervezési irányelvei a következők: járműalkatrészek optimalizált szerkezeti felépítése és topológiája, valamint fejlett könnyűszerkezetű kompozit anyagok alkalmazása. A polimer kompozit anyagok kis sűrűségűek, de nagy merevségűek és szilárdságuknak köszönhetően egyre növekvő mennyiségben vannak jelen ipari alkalmazásokban [1].

A járműipart tekintve a nagyon eltérő gyártási volumen miatt az egyes ipari szegmensekben eltérő anyagfelhasználás és technológia terjedt el. A repülőgépiparban a kompozit alkatrészek jellemzően prepreg előgyártmányból autoklávban készülnek [2]. A másik véglet az autóipar, ahol a nagyságrendekkel nagyobb szérianagyság és rövidebb termékéletciklus

a kis gyártási ciklusidőt és a magasfokú újrahasznosíthatóságot támasztja igényként. Ebből fakadóan a hőre lágyuló mátrixú kompozitok gyártása T-RTM (thermoplastic resin transfer molding) technológiával napjaink fontos kutatási iránya [3]. Az igazi áttörés azonban még várat magára. A két szegmens között helyezkedik el a ciklusidőt és szérianagyságot tekintve a haszonjármű- és buszipar [4, 5], ahol a térhálós mátrixú kompozitokat RTM (resin transfer molding) vagy vákuminfúziós technológiával gyártják. Külön kiemelendő a párizsi JEC Composites világkiállításon innovációs díjat nyert magyar fejlesztésű kompozit autóbusz [6]. A cikkben vizsgált anyagok erre az ipari szegmensre jellemző anyagok.

A térhálós mátrixú polimer kompozitok esetében a legelterjedtebb kötési mód a ragasztás [7], de alkalmaznak szegecsköteket, illetve féminzerteket is. Kötésekre abban az esetben van szükség, ha a szerkezetet nem egy komplex alkatrészként gyártjuk le, hanem több, de kisebb komplexitású alkatrész kötésével állítjuk elő a kívánt szerkezetet. Azonban a közönséges ragasztók egy nagyságrenddel kisebb merevségűek és a szilárdságuk is kisebb, mint ami a szénszálas kompozitokra jellemző. Tehát a szerkezet felosztásából származó költségelőny ellenére előfordulnak olyan hátrányok a mechanikai viselkedésben, amelyek a végső költségeket és az össztömeget negatívan befolyásolják. Az általános vélekedés, hogy olyan helyen kell felosztani a szerkezetet, ahol kis igénybevételek vannak, azok is lehetőleg nyírás jellegűek. Ezen kívül a kötést úgy kell megtervezni, hogy ne érje homogén, a kötés teljes hossza mentén ható terhelés, csökkentve ezáltal a lefejtő igénybevételt és a kúszást [8].

A kötés konstrukciós kialakításának szempontjából lényeges, hogy milyen irányból terhelik a kötést. A húzó igénybevétel ragasztott kötés esetén nem kedvező, mert a ragasztóanyag szilárdsága kisebb, mint a ragasztandó alkatrészeké, így azok szilárdságát nem tudjuk kihasználni. Szintén kerülendő a lefejtő, illetve üté igénybevétel. A legkedvezőbb, ha a kötés nyíró igénybevételnek van kitéve. Ennek okán a legelterjedtebb kötési módok az átlapolt kötések [7].

A tervezési fázisban a héjszerkezet globális merevségi és szilárdsági vizsgálata mellett fontos a szerkezetben alkalmazott kötések mechanikai vizsgálata is. Ennek legelterjedtebb módszere a végeselemes módszer, amely kiterjed a kompozitok komplex tönkremeneteli módjainak jellemzésére [9], valamint rétegeltválás (delamináció) vagy ragasztott kötés tönkremenetele

¹ eCon Engineering Kft., 1116 Budapest, Kondorosi út 3.

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

is számolható [10] ún. kohéziós zóna modellekkel. Ezekhez bemenő adatként meghatározandó a fajlagos repedésterjesztő erő a normál- és nyíró törési módokra, melyek kísérleti meghatározására ASTM szabványok adnak útmutatást [11, 12].

A munkánk célja egy vinilészter mátrixú, üvegszál erősítésű kompozit lemez átlapolt ragasztott kötéseinek törésmechanikai vizsgálata két különböző kötőanyaggal a fajlagos repedésterjesztő erő meghatározására és a mérések kiértékelési módszereinek összehasonlítása. Az így meghatározott mechanikai jellemzők a ragasztott kötés tönkremenetelének későbbi véges elemes analíziséhez szolgáltatnak bemenő paramétereket. Mivel ezek az értékek nem elérhetők a különböző szoftverek saját adatbázisaiban, ezért szükséges a kísérleti meghatározásuk.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK, VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

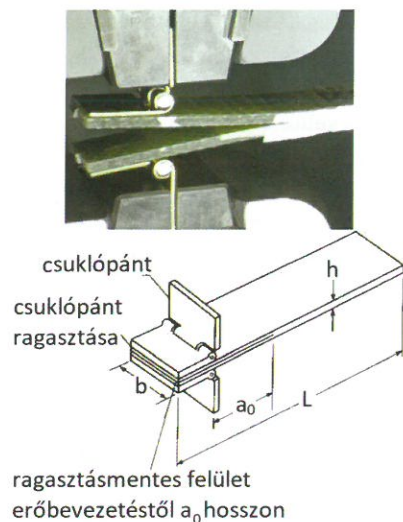
A polimer kompozit héjszerkezet vizsgálatához választott anyag egy üvegszál erősítésű, vinilészter mátrixú kompozit. Az anyag járműiparban elterjedt, így az eredmények közvetlen ipari hasznosításának adott a lehetősége. Az üvegszál erősítés struktúráját tekintve egy multidirekcionális kelme, melynek rétegrendje $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$. A termék kereskedelmi megnevezése a rétegrendre utalva quadroaxiális kelme (Saertex – QE fabric). A kelme fajlagos tömege 1232 g/m^2 , melyben a különböző irányultságú üvegszál rétegeket 76 dtex-es , 6 g/m^2 fajlagos tömegű poliészter szálakkal fűzik össze. Az általunk vizsgált kompozit lemezben négy réteg quadroaxiális kelme van egymáson azonos orientációval, szimmetrikus felépítéssel. Így a kompozit lemez vastagsága $3,6 \text{ mm}$. A kompozit mátrixanyaga a Distitron VE220 kereskedelmi megnevezésű vinilészter gyanta, amelyet jellemzően gyantainjektálás technológiához (RTM) ajánlanak. A gyártói adatlap alapján a folyékony gyanta viszkozitása szobahőmérsékleten $270\text{--}380 \text{ mPas}$, a gélesedési idő $9\text{--}15 \text{ perc}$, az exoterm csúcshőmérséklet $170\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$. A próbatetek gyártásához iniciátorként $1,5 \text{ m\%}$ Butanox M50-et (metil-etil-ke-ton-peroxid dimetil-ftálsavas oldata) alkalmaztunk, illetve gyorsítóként $0,3 \text{ m\%}$ kobaltoldatot. A térhálósodási idő legalább 24 óra szobahőmérsékleten. Az utókezelés 3 óra volt $100 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten. A próbatetekhez a síklapgyártás vákuuminfúzióval történt.

Az átlapolt kötések törésmechanikai jellemzésére egyrészt a vinilészter gyantát, tehát a kompozit saját mátrixanyagát, másrészt AcraLock járműipari ragasztót használtuk kötőanyagként. Az AcraLock SA 10 HV széria két komponensű, magas nyírószilárdságú és merevségű, kiváló nyúlási tulajdonságú, alapozómentes, jó réskitöltésű ragasztó. A kötőanyaga egy metakrilát alapú térhálós polimer. A kötőanyagot és az aktivátort $10:1$ arányban kell keverni. A termék adatlapja szerint a fazékidő 70 perc . A kötőanyag felvitele előtt a felületek tisztítása metanollal történt.

2.1. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK

A ragasztott kötések mechanikai jellemzésére merevségi szempontból a kötőanyagok modulusz értékeinek meghatározásán túl a szakító- és nyírószilárdságuk ismeretében már nem csak a deformációs viselkedés modellezhető, hanem a tönkremenetelre is adható becslés. A tönkremeneteli folyamat megismeréséhez azonban szükséges még az ún. fajlagos repedésterjesztő erő

meghatározása. Ezt a mennyiséget a törésmechanikából ismert I. és II. törési módra is meg kell állapítani, ezek a normál és a nyíró igénybevétel hatására bekövetkezett tönkremenetelre utalnak. Normál igénybevétel esetére a vonatkozó tesztípus az ún. dupla-konzolos teszt (DCB-teszt, double cantilever beam test). A mérési összeállítást az 1. ábra mutatja. A releváns méreteket az 1. táblázat foglalja össze. A két téglalap alakú próbatetet kell összeragasztani, majd egy fém csuklópánt segítségével széthúzni, az erő és elmozdulás regisztrálásán túl szükséges még mérni a repedésméretet is.

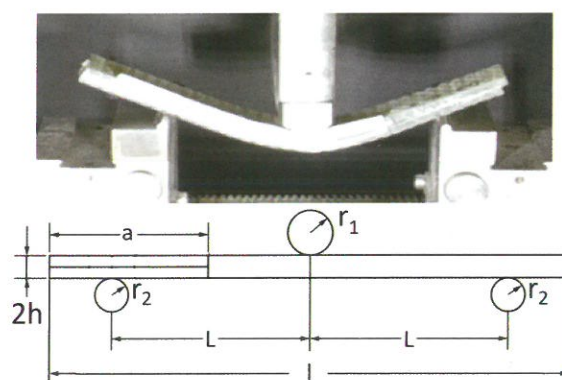


1. ábra. Ragasztott kötés DCB-tesztjének elrendezési vázlata

1. táblázat. Ragasztott kötés DCB-tesztjének geometriai méretei

Méret megnevezése	Méret jele	Méret [mm]
Teljes hossz	L	127
Szélesség	b	25,4
Vastagság (rétegrend alapján kiadódik)	h	7
Ragasztásmentes felület hossza az erőbevezetés helyétől	a_0	50

A fajlagos repedésterjesztő erő nyíró igénybevétel esetére is meghatározandó. Ennek általunk választott módszere a bemetszett végű próbatet hajlítótesztje (ENF-teszt, end-notched flexure test). A mérési elrendezést a 2. ábra mutatja, a releváns méreteket a 2. táblázat foglalja össze.



2. ábra. Ragasztott kötés ENF-tesztjének elrendezési vázlata

2. táblázat. Ragasztott kötés ENF-tesztjének geometriai méretei

Méret megnevezése	Méret jele	Méret [mm]
Teljes minta hossz	l	163
Szélesség	B	25.4
Vastagság	2h	7
Teljes alátámasztási hossz	2L	100
Terhelés bevezetés helye a támasztó görgőktől	L	50
Ragasztásmentes felület hossza (végbemetszés)	a	45
Terhelő görgő sugara	r ₁	8.0
Támasztó görgő sugara	r ₂	3.0

A repedésméret meghatározásához Mercury típusú, nagysebességű kamerával vettük fel a folyamatot, majd az ENF próbatestek beszállított oldalfelületén az egyes képkockák manuális kiértékelésével (visual crack tracing) határoztuk meg a repedésméretet az idő függvényében. A DCB próbatestek esetén ennek meghatározását az NI Video Measurement Suite kiértékelő szoftverével automatizáltuk.

2.2. A FAJLAGOS REPEDÉSTERJESZTŐ ERŐ MEGHATÁROZÁSI MÓDSZEREI

A törési folyamattal több tudományterület is foglalkozik. A repedések keletkezésével az anyagtudomány, a repedés megindulásának és terjedésének vizsgálata a törésmechanika feladata, melynek alapja Griffith és Irwin nevéhez kötődik. A fajlagos repedésterjesztő erő bevezetése azon alapszik, hogy egy lineárisan rugalmas lemezben a feszültségmezőt tekintve a repedéscsúcsban szingularitás van, a feszültség elméleti értéke végtelen, ezért feszültség alapú kritérium nem alkalmazható. A fajlagos repedésterjesztő erőnek azonban van egy, a szerkezet anyagára jellemző kritikus értéke, melyet, ha az aktuális terhelési viszonyok mellett elérünk, akkor törés várható. A fajlagos repedésterjesztő erő az alábbi módon írható fel:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (1)$$

ahol W a külső erők munkája, U az alakváltozási energia, A az erők hatására kialakuló szabadszél. Ha a külső erők munkáját és az alakváltozási energiát kifejezzük a külső erővel és az elmozdulással az erő támadáspontjában, akkor a következőt kapjuk:

$$G = \frac{P^2}{2b} \cdot \frac{dC}{da} \quad (2)$$

ahol P a terhelő erő, b a próbatest szélessége, a a repedésméret, C a rendszer rugóállandója. A rugóállandó az erő támadáspontjában értelmezett elmozdulás és a terhelő erő hányadosa. Ez a kifejezés az alapja a különböző mérési kiértékelési módszereknek. Az alábbiakban ezeket foglaljuk össze.

Direkt rúdelmélet (DBT - Direct Beam Theory)

A direkt módszer azt jelenti, hogy G meghatározásához közvetlenül a mért erő és elmozdulás értékeket használjuk. A direkt rúdelmélet azt feltételezi, hogy a repedéscsúcs ideális befogásként modellezhető. Ha kifejezzük a próbatestre értelmezett rugóállandót és behelyettesítünk, akkor a DCB-teszt esetére G értéke a következőképpen határozható meg:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (3)$$

ahol P a mért erő, δ a mért elmozdulás, b a próbatest szélessége, a a repedésméret. Ugyanez az ENF-teszt esetére:

$$G_{II} = \frac{P\delta}{2b} \cdot \frac{9a^2}{3a^3 + 2L^3} \quad (4)$$

ahol 2L a hajlítóbefogó támasztógörgőinek távolsága.

Módosított rúdelmélet (MBT - Modified Beam Theory)

Az előbbi módszer túlbecsüli a fajlagos repedésterjesztő erő értékét, mert a gyakorlatban a repedéscsúcs nem tekinthető ideális befogásnak, a repedéscsúcs környezetében plasztikus alakváltozás van jelen, ez a jelenség a DCB próbatest esetére azt jelenti, hogy a repedéscsúcs, amit befogásként veszünk figyelembe a mechanikai modellben nem nyomatékmerev, a keresztmetszetek kis mértékű elfordulásának adott a lehetősége. Ennek figyelembevételére egy lehetőség, hogy a repedésméretet úgy tekintjük, mintha nem a, hanem $a+\Delta$ mértékű lenne, ahol Δ a következőképpen határozható meg. Ábrázoljuk a rugóállandó köbgyökét a repedésméret függvényében, majd legkisebb négyzetek módszerével illesztünk egy egyenest, aminek az x-tengellyel való metszéspontja megadja a Δ értékét. A C rugóállandó az aktuálisan mért erő és elmozdulás hányadosa. A módszert a 3. ábra szemlélteti.

A fajlagos repedésterjesztő erő meghatározása pedig a módosított rúdelmélet szerint DCB-teszt esetére a következőképpen adódik:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+\Delta)} \quad (5)$$

Rugóállandó kalibrációja (CC - Compliance Calibration Method)

Ennél a módszernél nem a repedéshossz értékét korrigáljuk, hanem a rendszer rugóállandóját. A DCB-teszt esetére a rugóállandót – az aktuálisan mért erő és elmozdulás hányadosát – a repedésméret függvényében log-log skálán ábrázoljuk, majd legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztünk és meghatározzuk az egyenes meredekségét. A módszert a 4. ábra szemlélteti.

Az egyenes meredeksége megadja a korrekciós tényezőt, amellyel a fajlagos repedésterjesztő erő az alábbi módon számolható:

$$G_I = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (6)$$

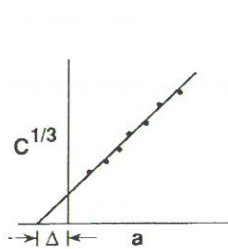
A II. törési módra az ENF-teszt esetén a kalibráció a következő módon történik. A rendszer rugóállandóját a repedésméret köbének függvényében ábrázoljuk, majd a mérési pontokra egyenest illesztünk, az egyenes meredeksége megadja az m korrekciós tényezőt. Ezzel a II. törési módra vonatkoztatott fajlagos repedésterjesztő erő az alábbi képlettel számolható:

$$G_{II} = \frac{3mP^2a^2}{2b} \quad (7)$$

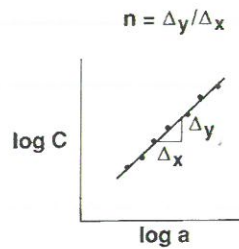
Módosított rugóállandó kalibráció (MCC - Modified Compliance Calibration Method)

A módosított rugóállandó kalibráció módszerénél a repedésméretet a próbatest vastagságával normalizáljuk, majd ezt ábrázoljuk a rugóállandó köbgyökének függvényében. Ezután az előző módszerhez hasonlóan egyenest illesztünk a legkisebb négyzetek módszerével, amelynek a meredeksége megadja a korrekciós tényezőt. A módszert a 5. ábra szemlélteti.

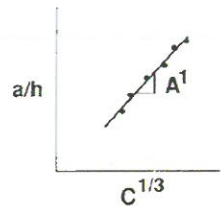
Az egyenes meredeksége megadja az A₁ korrekciós tényezőt, amellyel a fajlagos repedésterjesztő erőt a következő képlet szerint számolhatjuk:



3. ábra. Módosított rúdelmélet – Δ meghatározása



4. ábra. Rugóállandó kalibrációja – n korrekciós tényező meghatározása



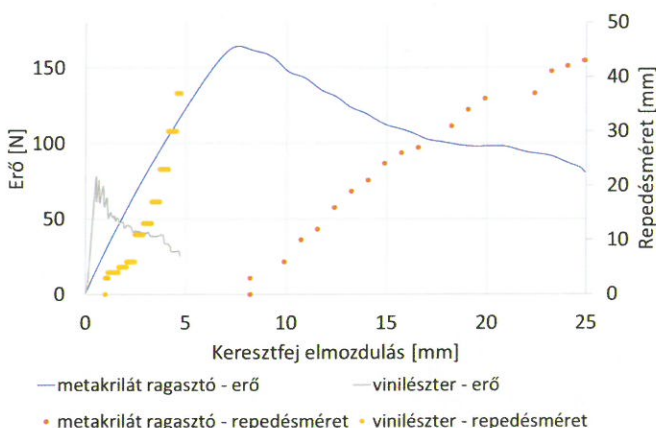
5. ábra. Módosított rugóállandó kalibráció – A_1 korrekciós tényező meghatározása

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 b h}, \quad (8)$$

A módosított rúdelmélet és a módosított rugóállandó kalibrációs korrekciói az ENF-teszt esetére összetettebbek és szükségesek hozzájuk a próbatest hossz- és keresztirányban értelmezett rugalmassági moduluszai, illetve a síkbeli nyíró-rugalmassági modulusz [13]. Mivel önmagukban az ENF-teszt mért mennyiségei nem elégségesek, azért a kiértékelésben a módosított rúdelméletet és a módosított rugóállandó kalibrációs módszert csak DCB-teszt esetére alkalmaztuk.

3. EREDMÉNYEK

3.1. DCB-TESTZT

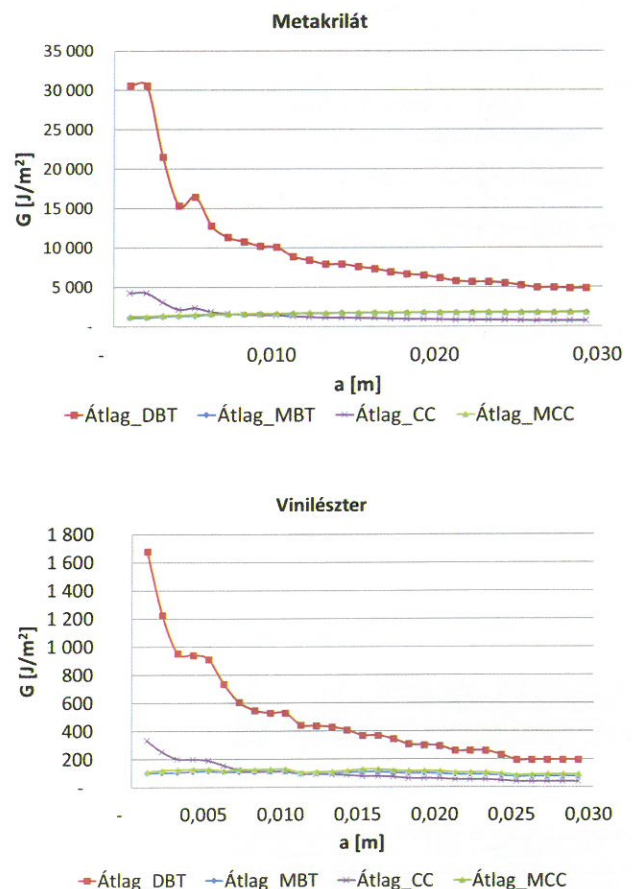


6. ábra. DCB-teszt mért görbéi

A 6. ábra egy metakrilát ragasztóval és egy vinilészter kötőanyaggal ragasztott próbatest mérési eredményeit mutatja. Folytonos vonallal az erő-elmozdulás görbe látható, pontokkal pedig a repedésméret. A tönkremenetel kezdetéig nézve az erőgörbék meredekségében jelentős különbség van. Ez összhangban van azzal, hogy a húzóvizsgálattal megállapított rugalmassági moduluszt tekintve a vinilészter csaknem 2,5-szer merevebben viselkedik a metakrilát ragasztóhoz képest. Előbbi rugalmassági modulusza 1000 MPa fölötti, utóbbinak 450 MPa. A tönkremenetelt tekintve viszont annak ellenére, hogy az alkalmazott vinilészter szakítószilárdsága 31 MPa, míg a metakrilát ragasztóé 18 MPa, a DCB-teszten az utóbbi kétszer nagyobb szilárdságot mutat. A tönkremenetel a metakrilát esetében 165 N-nál indul meg, a vinilészternél már 80 N-nál. Ez abból adódik, hogy a vinilészter mátrixú kompozit és a metakrilát ragasztó között olyan mértékű a határfelületi adhézió, hogy a DCB-teszten tapasztalt tönkremenetel minden esetben kohéziós jellegű, ahol a ragasztóréteg anyagán belül fut végig a repedés. Ezzel szemben a vinilészter kötőanyaggal a tönkremenetel a határfelületen indul meg, majd a repedés a határfelületen vagy a kötőanyagon belül

terjed tovább. Ennek a jelenségnek a kiküszöbölésére elméleti megoldás lenne, ha az alapanyagként alkalmazott vinilésztert és a kötőanyagként alkalmazott vinilésztert egyszerre térhálósítanánk ki, azonban ez az ipari gyakorlatban nem működik, tekintve, hogy éppen azért van szükség a ragasztott kötésre, mert egy nagy méretű és komplex alkatrész helyett több kisebb méretű és kisebb komplexitású alkatrész gyártása, majd ezek utólagos kötése gazdaságosabb lehet. A repedés terjedését tekintve a metakrilát szívós viselkedést mutat folyamatos repedésterjedéssel, míg a vinilészter ridegen viselkedik instabil repedésterjedéssel. Ezt mutatja az erőgörbe oszcilláló jellege.

A 7. ábra a különböző módszerrel kiértékelt ellenállásgörbéket mutatja a két kötőanyag esetére. Egy-egy görbe az 5 próbatestből álló mérési sorozatok átlaggörbéje. A görbék jellege és az értékek nagysága alapján látható, hogy a lineárisan rugalmas törésmechanikát alkalmazó direkt rúdelmélet (DBT - Direct Beam Theory) a korrigált elméletekhez képest szignifikánsan eltérő eredményeket ad. Ez alapján kijelenthető, hogy a mért anyagpárookra a repedéscsúcs közvetlen környezetében lévő nemlineáris anyagi viselkedés nem elhanyagolható.



7. ábra. DCB-teszt: a kiértékelt ellenállásgörbék metakrilát és vinilészter kötőanyag esetére

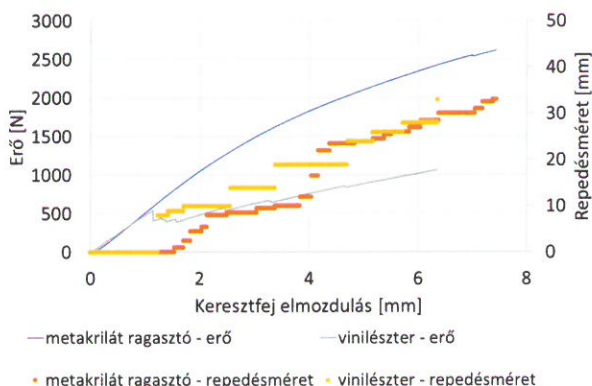
A 3. táblázat foglalja össze a különböző módszerrel kiértékelt átlagos repedésterjesztő erőket az I. terhelési módra vonatkozóan. A direkt rúd elmélettel kapott értékek jelentősen kiugróak a többi módszerrel kiértékelt értékekhez képest. A korrekció nélküli CC (Compliance Calibration) módszer pedig mindkét esetben a legkisebb értékeket adja. A vinilészternél a mérések kétszer nagyobb relatív szórást mutatnak, ami a ridegebb viselkedés miatti instabil repedésterjedés következménye.

3. táblázat. DCB-tesztek mérési eredményei

	Metakrilát ragasztó			
	DBT	MBT	CC	MCC
G_I átlag [J/m^2]	5899	1752	851	1758
rel. szórás [%]	17	20	12	20
	Vinilészter			
	DBT	MBT	CC	MCC
G_I átlag [J/m^2]	265	93	57	107
rel. szórás [%]	47	35	57	26

3.2. ENF-TESZT

A 8. ábra egy-egy ENF próbatest mérési eredményeit mutatja a két különböző kötőanyaggal.



8. ábra. ENF-teszt mért görbéi

Látható, hogy a vinilészter kötőanyag esetében a repedés megindulásának pillanatában egyértelmű visszaesés van az erőgörbében, a repedéshossz pedig hirtelen 8 mm-re ugrik. A metakrilátnál a repedés egyenletesen nő, az erőgörbe emiatt folytonos marad.

A nyíróterhelésre adott deformációs választ tekintve a két kötőanyag egymással megegyező módon viselkedik. Az erőgörbék kezdeti meredeksége megegyezik. A repedés megindulásához tartozó erőben sincs nagy különbség. A II. terhelési módra vonatkozó fajlagos repedésterjesztő erők értékeit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. ENF-tesztek mérési eredményei

	Metakrilát ragasztó	
	DBT	CC
G_{II} átlag [J/m^2]	684	946
rel. szórás [%]	21	23
	Vinilészter	
	DBT	CC
G_{II} átlag [J/m^2]	528	1218
rel. szórás [%]	57	50

A II. terhelési módra a direkt rúd elmélet és az rugóállandó kalibrációs módszer alkalmazható közvetlenül. Az eredmények alapján a két kötőanyag nyíróviselkedése nagyon hasonló, az értékek azonos nagyságrendben maradnak. A vinilészter ridegebb viselkedése ez esetben is nagy relatív szórást mutat.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban üvegszálerősítésű, vinilészter-mátrixú kompozit ragasztott kötésének törésmechanikai vizsgálatát mutattuk be DCB- és ENF-tesztek segítségével, kötőanyagként vinilészter és egy metakrilát ragasztó alkalmazásával. Meghatároztuk az I. és II. törési módra értelmezett fajlagos repedésterjesztő erőt (G), ami véges elemes szimulációkhoz szolgáltat bemenő paramétereket. A vizsgálat azt mutatja, hogy a mérési adatok feldolgozására a módosított rúd elmélet, vagy a rugóállandó-kalibrációs módszerek alkalmasak. A kötőanyagokat tekintve a metakrilát ragasztó egy nagyságrenddel nagyobb G -értékeket mutat az I. terhelési módra, amíg a II. terhelési módra hasonlóan viselkedik a két kötőanyag.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH Alapból valósul meg, a projekt címe: „Polimer kompozit termékek előállítása rövid ciklusidejű, automatizált gyártástechnológia segítségével, gépjárműipari alkalmazásokra, különös tekintettel a kompozit elemek komplexitására és újrafeldolgozhatóságára”; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0046. A kidolgozók köszönik a támogatást. A cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Czigány, T.; Izer, A.; Tábi, T.: Polimer kompozitok – áttekintés, Műanyag és Gumi, 44, 185-191 (2007).
- [2] Upadhyay, A. R.; Dayananda, G. N.; Kamalakannan, G. M.; Setty, J. R.; Daniel, J. C.: Autoclaves for aerospace applications: Issues and challenges, International Journal of Aerospace Engineering, 11, 11 (2011).
- [3] Semperger, O. V.; Öri, Z.; Hegedűs, G.; Molnár, P.: Gyártástechnológiai fejlesztés nagy komplexitású, hőre lágyuló mátrixú kompozit előállítására, Polimerek, 4, 123-128 (2018).
- [4] <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/making-modular-bus-body-shells-composite-materials> (2011.02.18.)
- [5] <https://www.compositesworld.com/blog/post/composites-give-shape-to-new-passenger-bus> (2018.02.23.)
- [6] <http://www.jeccomposites.com/about-jec/press-releases/jec-group-celebrates-composites-innovations-jec-world-2016-and-rewards-28> (2016.02.8.)
- [7] Dilger, K.: Selecting the right joint design and fabrication techniques, in 'Advances in structural adhesive bonding' (eds.: Dillard D.), Woodhead Publishing, Vol. 1, 295-315 (2010).
- [8] Mosallam, A.: Analysis and design of adhesively bonded composite joints, in 'Design guide for frp composite connections' (eds.: ASCE), Vol. 1, 157-214 (2011).
- [9] Szekrényes, A.; Uj, J.: Finite element modelling of the damage and failure in fiber reinforced composites (overview), Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering, 46, 17 (2002).
- [10] Szekrényes, A.: Analytical and numerical cohesive zone models in the fracture simulation of fiber reinforced materials, in '14th European Conference on Composite Materials' (ECCM14), Budapest, 2010.
- [11] ASTM D5528 - 13: Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM International (2013).
- [12] ASTM D7905/D7905M-14: Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM International (2014).
- [13] Wang, Y.; Williams, J. G.: Corrections for mode II fracture toughness specimens of composite materials, Composites Science and Technology, 43, 251-256 (1992).